

EXERGY ANALYSIS FOR A FURNACE IN THE PRODUCTION OF PANELA**ANÁLISIS EXERGÉTICO DE UN HORNO DE LECHO FIJO EN LA
PRODUCCIÓN DE PANELA**

MSc(c). Juan Guillermo García Rincón*, **MSc(c). Jhon Arévalo Toscano****
MSc(c). Gustavo Guerrero Gómez**

* **Servicio Nacional de Aprendizaje**, Red Tecnoparque Colombia, Nodo Ocaña.
Transversal 30 #7-110 Barrio la Primavera, Ocaña, Norte de Santander, Colombia.
Tel:+(57+7) 5611035.

E-mail: jggarcia87@misena.edu.co.

** **Universidad Francisco de Paula Santander**, Facultad de Ingenierías.
Via Acolsure, Sede Algodonal, Ocaña, Norte de Santander, Colombia.
Tel:+(57+7) 5690088 ext. 211.

E-mail: {jarevalot,gguerrero}@ufpso.edu.co.

Abstract: The furnaces used for the manufacture of sugar cane have energy losses due to incomplete combustion of sugar cane bagasse and sensible heat in the flue gases. During production of sugar cane, bagasse from sugar cane is used as fuel, with mass fractions of humidity between 30% and 50%, which affect the combustion efficiency in the furnace. The objective of this research is to study the influence of bagasse which is introduced into the furnace of a fixed bed, features, analysis and conclusions. Looking establish operating conditions that lead to obtain the best performance in the combustion of biomass.

Keywords: Sugarcane bagasse, combustion, fixed bed oven, brown sugar.

Resumen: Los hornos utilizados para la elaboración de la panela presentan pérdidas energéticas debido a una combustión incompleta del bagazo de caña de azúcar y al calor sensible en los gases de chimenea. Durante el proceso de producción de la panela, el bagazo de caña de azúcar se utiliza como combustible, con fracciones máxicas de humedad entre 30% y 50%, las cuales afectan el rendimiento de la combustión en el horno de lecho fijo. El objetivo de esta investigación es estudiar la influencia del bagazo de caña que se introduce en el horno de lecho fijo, sus características, análisis y conclusiones. Buscando establecer las condiciones de operación que conlleven a obtener el mayor rendimiento en la combustión de la biomasa.

Palabras clave: Bagazo de caña azúcar, combustión, horno de lecho fijo, panela.

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, el Ministerio de Agricultura en diálogos permanentes con entidades nacionales, departamentales y locales busca acuerdos que favorezcan al subsector panelero, dando un apoyo al plan de asistencia técnica gremial acorde al mejoramiento de la calidad en la producción de

panela (Comunicado de Prensa, 2013). En la mayoría de las fincas paneleras se quema el bagazo en hornos artesanales, ya que este es el producto que queda de la caña después de ser molida en los trapiches que extraen el jugo para la elaboración de la panela (Escobar, 1997), esto obedece al gran poder calorífico del bagazo para su quema (Alarcon, *et al.*, 2006).

La cantidad de bagazo depende de su humedad, fibra de la caña, tipo de cosecha; y es aproximadamente el 30% de la caña molida (Alarcón, *et al.*, 2006). La humedad del bagazo depende de la cantidad de agua de imbibición empleada y de la eficiencia de los molineros del trapiche. La cantidad de cenizas depende de la variedad de caña y del tipo de cosecha empleado, que en el caso de ser mecanizada aumenta considerablemente debido al mayor porcentaje de “trash”, principalmente en la tierra (Agüero, *et al.*, 2004).

La humedad, representa una pérdida del poder calorífico, porque gran parte del calor desprendido por la oxidación del carbono, se consume en la evaporación del agua contenida en el combustible afectando seriamente la transferencia específica de energía, y aumentando la pérdida de calor en los gases de combustión.

La combustión es una reacción química de oxidación donde actúan de forma directa en un proceso de quema: el combustible, el oxígeno y el calor (Fristrom, 1969). El bagazo de caña se ha convertido para Colombia en una prioridad energética a partir de la disminución real de la disponibilidad de combustibles derivados del petróleo (Hernández, 2011). El bagazo en Colombia se ha utilizado siempre como combustible, incluso fundamental, en la inmensa mayoría de las fincas paneleras, donde se ha quemado en sustitución del petróleo. No obstante, su rendimiento es bajo, ya que la tecnología que se emplea para dicho fin no aporta los rendimientos que se necesitan hoy desde el punto de vista energético (Paz y Cárdenas, 1999).

Los hornos utilizados para la elaboración de panela presentan pérdidas energéticas debido a una combustión incompleta del bagazo de caña de azúcar y al calor sensible en los gases de chimenea. Durante el proceso de producción de panela, el bagazo de caña de azúcar se utiliza como combustible, con fracciones másicas de humedad entre 30% y 50%, las cuales afectan el rendimiento de la combustión de una biomasa en lecho fijo (Castro, *et al.*, 2013).

El caso de estudio es una finca panelera, ubicado al noroeste de Colombia en el Departamento de Norte de Santander en la provincia de Ocaña en un sector llamado “Llano grande” (8°45'01.1" latitud norte y 72°45'20.2" latitud oeste), a 701 msnm, temperatura media de 30°C, precipitación media anual de 1800 mm y humedad relativa de 79.1%

(“NASA Surface meteorology and Solar Energy: RETScreen Data,” 2014). El objetivo de esta investigación es establecer las condiciones de operación del bagazo de caña que se introduce en el horno de lecho fijo, sus características, análisis y conclusiones; buscando la optimización del rendimiento en la combustión de la biomasa.

2. DESARROLLO

2.1 Características del bagazo de caña como combustible

El bagazo es una fibra principal excedente de material, luego de procesar la caña en la extracción del jugo este es un material nervudo, heterogéneo en cuanto a su composición granulométrica y estructural, que presenta relativamente baja densidad y un alto contenido de humedad, en las condiciones en que se obtiene del proceso de trituración de la caña de azúcar. El contenido en cenizas del bagazo natural puede considerarse moderado, ubicándose entre 2 y 5 % (bs). Sin embargo, como consecuencia directa de la mecanización de la cosecha, y sobre todo en época de lluvia, este parámetro puede elevarse considerablemente, llegándose a reportar valores extremos de 12 a 15 % (Pérez, *et al.*, 2007). En la Tabla 1, en forma más detallada, se pueden apreciar los componentes del aire seco, según Baloh y Wittwer (Baloh, 1995).

Tabla 1. Composición de aire seco

Composición del aire seco	% Volumen	% Peso
Oxígeno.	21,00	
Nitrógeno.	78,05	
Argón.	0,92	
Dióxido de carbono.	0,03	

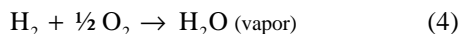
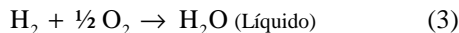
Fuente: Baloh & Wittwer, Energy Manual for Sugar Factories, p. 174.

De forma más general, la composición del bagazo muestra los siguientes rangos de variación encontrados en la práctica:

- ✓ Contenido de agua: 45 a 57%
- ✓ Contenido de fibra: 39 a 53%
- ✓ Sólidos disueltos: 2 a 6%

La fibra está constituida por los componentes insolubles en agua y puede subdividirse a su vez en dos componentes principales: fibra verdadera (células de paredes fuertes y duras, cilíndricas) y médula (células de paredes delgadas y blandas, de forma irregular que constituyen el tejido interior del tallo).

Los dos elementos útiles de un combustible desde el punto de vista de la combustión son el carbono (C) y el hidrógeno (H₂), que pueden arder según las reacciones siguientes:



La reacción (1) expresa una combustión incompleta, porque el carbono no llega al máximo de oxidación y, por tanto, no desarrolla toda la energía calorífica de la que es capaz, energía que, en cambio, se desarrolla en la reacción (2), que representa una combustión completa. La reacción (3), en la que se considera el agua producida en estado líquido, da el llamado poder calorífico superior o valor calorífico superior, el cual indica el calor que puede obtenerse teóricamente del combustible, el cual se determina con los calorímetros, mientras que la reacción (4), en la que el agua se produce en estado de vapor, nos da el poder calorífico inferior, el cual indica el calor que puede obtenerse realmente, como lo muestra la Tabla 2. Se define el poder calorífico o valor calorífico de un combustible como el calor desarrollado por éste durante la combustión. Este calor se refiere a la unidad de peso o de volumen del combustible mismo. En la práctica interesa más el poder calorífico inferior o valor calorífico neto, debido a que los productos de la combustión salen de las instalaciones estando todavía calientes y, por tanto, con el agua en estado de vapor. Las Tablas 3, 4 y 5 muestran un análisis inmediato, elemental y además poderes caloríficos como resultado del bagazo en base seca.

Tabla 2. Composición de la caña de azúcar

Elemento	Bagazo	Paja
Hidrógeno, H	2,53 %	3,28%
Carbón, C	24,08%	23,48%
Nitrógeno, N	0,17%	-----
Oxígeno, O	21,43%	22,03 %
Poder calorífico	18,43 KJ/Kg*°K	17,05 KJ/Kg*°K

Tabla 3. Análisis inmediato (% base seca).

Característica	%
Carbono fijo	41,9
Volátiles	46,36
Cenizas	11,74

Tabla 4. Análisis elemental (% base seca).

Característica	%
Carbono	49,27
Hidrógeno	5,67
Nitrógeno	0,63
Azufre	0,30
Oxígeno	42,87

Tabla 5. Poderes caloríficos

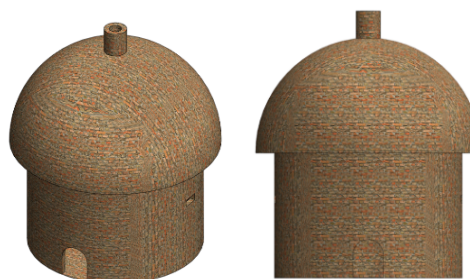
Especificación	(kcal/kg)	(kJ/kg)
Superior (bs)	4 627,3	19 374,2
Inferior (bs)	3 979,3	16 661,5

Fuente: Escalante H, Orduz J, Zapata HJ, Cardona MC, Duarte M. (2011)¹.

3. ANÁLISIS EXERGÉTICO DEL HORNO

Este análisis se realizó en un horno de lecho fijo del proceso actual. Las características del horno son: 5 000 mm de Altura, 4 000 mm de radio interior con 5 500 mm radio exterior y 450 mm de grosor de pared. En cuanto a sus dimensiones en la puerta de entrada al horno son: 2 160 mm de altura y 800 mm de ancho, representado en la Fig. 1.

El horno ha sido operado para quemar hasta 200 Kg/h de bagazo de caña (bs), pero en la actualidad se está trabajando con 166,67 Kg/h. La temperatura de entrada del aire ambiente es de 30°C y la salida de la mezcla de aire más los gases de combustión alcanzan en promedio unos 600°C.



(a) Vista isométrica del horno (b) Vista frontal del horno.

Fig. 1 Representación virtual horno de lecho fijo.

La combustión de una biomasa ocurre en tres etapas: secado, devolatilización y oxidación del material carbonizado. Inicialmente, la humedad es liberada a temperaturas por debajo de los 100 °C. El material seco incrementa su temperatura hasta el punto de devolatilización. Para el bagazo de caña la descomposición térmica inicia entre 200 °C (Ramajo-Escalera, *et al.*, 2006a) y 250 °C y culmina a los 600 °C. Los volátiles liberados reaccionan con el aire a 400 °C y forman una llama (Ramajo-Escalera, *et al.*, 2006b). Al final de la devolatilización queda un residuo denominado material carbonizado, el cual reacciona con el aire a temperaturas cercanas a los 650 °C.

¹Resultado final de la caracterización del bagazo de caña. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Bucaramanga, Colombia. Ediciones Universidad Industrial de Santander, 180 p.

Cuando la combustión de la biomasa se lleva a cabo en hornos de lecho fijo, las tres etapas ocurren como frentes que se propagan en contracorriente con el aire primario (Porteiro *et al.*, 2010). El calor transferido desde la llama, tanto por convección como por radiación, a las capas de biomasa fresca permite el secado y la devolatilización del material. Los volátiles liberados y el material carbonizado formado se oxidan liberando más calor y permiten propagación estable de los frentes (Kausley y Pandit, 2010).

La combustión de biomasa con altos contenidos de humedad presenta grandes tiempos de secado (Díaz, *et al.*, 2013), lo cual retrasa el inicio de la etapa de devolatilización y disminuye las tasas de consumo del material. El aumento de la humedad ocasiona una sobreposición de las etapas de secado, devolatilización y oxidación del material carbonizado, lo cual reduce el rendimiento del proceso. Durante la combustión de una biomasa en lecho fijo, la etapa de secado ocurre a temperaturas por debajo del punto de ebullición del agua (Molina, *et al.*, 2013). Por este motivo, el secado es controlado en cobertizos al aire libre mayormente buscando reducir la humedad.

El 30% de las pérdidas energéticas del horno de lecho fijo en la producción de panela corresponden al calor sensible en los gases de chimenea (García, 2011). En muchos sistemas de combustión la energía contenida en los gases de chimenea se reutiliza para el precalentamiento del aire.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El horno panelero trabaja bajo gases de combustión que se encuentran a 600°C, y para esas condiciones se toma una temperatura exterior promedio de 30°C (de los alrededores del horno). Se ha pensado en una pared compuesta, que comprendería conductividad de ladrillos refractarios ($k_1=0,36$ W/m.°C; $k_2=0,35$ W/m.°C; $k_3=0,27$ W/m.°C) y ladrillo común ($k_4=0,8$ W/m.°K) en dirección ambiente-horno.

Para la obtención de estos parámetros se calculan: las pérdidas de calor a través de las paredes, además es preciso estimar las pérdidas de calor adicionales, pero, en ocasiones, es más importante determinar la elevación local de temperatura en el exterior del horno o el campo de temperaturas a lo largo del lecho fijo, tanto en el interior como en el exterior del horno. Además de la temperatura en el interior del horno, influye el espesor de pared y,

evidentemente, la conductividad térmica del material que forma el puente térmico.

En este caso se ha limitado a aquel en que se conocían las temperaturas de contorno de los cuerpos en cuestión. Pero éste no es el caso en muchos de los problemas de importancia práctica que se encuentran en la literatura. Generalmente, las configuraciones anteriormente mencionadas se emplean en la práctica para separar fluidos a diferentes temperaturas perfectamente conocidas.

Si se produce un movimiento de fluido, como invariablemente se verifica tanto en el caso de convección libre como forzada, las capas límite térmica y de velocidad resultante, hacen que se produzca una diferencia de temperatura entre la masa principal de fluido (que se encuentra esencialmente a temperatura constante) y la superficie. Así, la interfaz de separación entre dos medios, tal como la que existe entre la pared del horno y el aire, da lugar a la aparición de una nueva resistencia a la transmisión de calor, dispuesta en serie con el grupo de resistencias de tipo conductivo.

4.1 Análisis

Temperatura en el interior del horno: $T_{a1} = 900^\circ\text{C}$

Temperatura en el exterior del horno: $T_{a2} = 30^\circ\text{C}$

4.2 Transferencia de calor por convección en el exterior del horno

La temperatura ambiente promedio:

$$H_{30^\circ\text{C}} = 9 \left(\frac{\text{BTU}}{\text{h.ft}^2.\text{°F}} \right) \quad (5)$$

Por medio del factor de conversión se tiene:

$$h_{30^\circ\text{C}} = 1,36 H_{30^\circ\text{C}} = 12,204 \left(\frac{\text{BTU}}{\text{h.ft}^2.\text{°F}} \right) \quad (6)$$

Por medio del factor de conversión a UI se tiene:

$$h_{900^\circ\text{C}} = 1,36 H_{900^\circ\text{C}} = 48,82 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2.\text{°C}} \right) \quad (7)$$

4.3 Coeficiente de conductividad térmica

Valores promedio de la conductividad para ladrillos refractarios.

$$K_1 = 0,36 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}.\text{°C}} \right); K_2 = 0,35 \left(\frac{\text{W}}{\text{m}.\text{°C}} \right) \quad (8)$$

En la Fig. 2, El coeficiente de conductividad térmica del aislamiento para la manta de fibra cerámica:

$$r = 128 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) ; K_3 = 0,27 \left(\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \right) \quad (9)$$

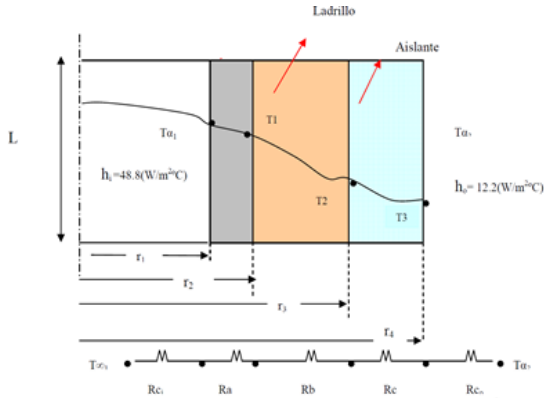


Fig. 2 Coeficiente de conductividad de la pared

La pérdida por pared, se dan a la diferencia de temperatura entre las pared y un medio circundante.

$$D_o = 2,5\text{m}; D_i = 1,6\text{m}; L = 3\text{m}; K_{\text{ladrillo}} = 0,8 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{K}}$$

$$R_k = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k l} = 0,03 \frac{^\circ\text{K}}{\text{W}} \quad (10)$$

$$U = \frac{1}{R_k} = 33,79 \frac{\text{W}}{^\circ\text{K}} \quad (11)$$

Distribución de temperaturas para conducción estacionaria a través de una pared plana compuesta:

$$Q = U f_{\text{temperaturas}} = 141682,3 \text{ W} \quad (12)$$

La temperatura promedio de calentamiento a la entrada del horno es, $T_1 = 183,82^\circ\text{C}$ Aplicado al específico, encontramos:

$$C_p = 0,23 + 0,0005T_1 = 0,3219 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} \quad (13)$$

El consumo de bagazo en una producción de panela, está representado por C_c consumo de bagazo kg/h :

$$\left(\frac{1500\text{kg}}{9\text{días}} \right) = 166,67 \frac{\text{kg}_{\text{bagazo}}}{\text{día}} = 41,67 \frac{\text{kg}_{\text{bagazo}}}{h} \quad (14)$$

$$C_c = 959,96 \frac{\text{kg}_{\text{humo}}}{h}$$

En el horno, el flujo de masa producido por los gases en la unidad de tiempo, se toma en kg/h :

$$m_{\text{as}} = C_c \cdot t = 5759,76 \text{ kg}_{\text{humo}} \quad (15)$$

Calor desaprovechado que sale por la chimenea de la combustión en las hornillas, se representa por:

$$Q_h = m_{\text{as}} \cdot C_p \cdot \Delta T = 201896,74 \text{ kJ} \quad (16)$$

4.4 Calor de entrada en el horno

Este calor es liberado y es igual al poder calorífico multiplicado por la cantidad total de consumo de bagazo durante el proceso de cocción.

$$Q_H = P_c \cdot m_c = 29,061 \cdot 10^6 \text{ kJ} \quad (17)$$

4.5 Pérdidas intangibles

Esta pérdida se calculará como el excedente o diferencia entre la energía disponible por el combustible y la sumatoria de los calores calculados anteriormente.

$$Q_{\text{in}} = Q_H - Q_T = 27,53 \cdot 10^6 \text{ kJ} \quad (18)$$

4.6 Coeficiente global del horno

Coeficiente global para todas las paredes:

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{e_{\text{horno}}}{K_{\text{horno}}} + \frac{1}{h_t}} = 0,21 \frac{\text{kcal}}{\text{h.m}^2^\circ\text{C}} \quad (19)$$

Coeficiente global para el piso:

$$U_2 = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{e_{\text{horno}}}{K_{\text{horno}}} + \frac{1}{h_t}} = 1,82 \frac{\text{kcal}}{\text{h.m}^2^\circ\text{C}} \quad (20)$$

Calor necesario para compensar las pérdidas de las paredes:

$$q_4 = 910596,45 \text{ kcal} \quad (21)$$

$$L = \frac{A_s}{P} = \frac{1134 \text{ in}^2}{162 \text{ in}} = 7 \text{ in} = 0,178 \text{ m} \quad (22)$$

Flujo completamente desarrollado, se define por el número de Nusselt locales son una constante en la región, pero su valor depende de las condiciones térmicas de la superficie:

$$\overline{Nu}_1 = 0,68 + \frac{0,670 Ra_1^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{4}{9}}} = 61,54 \quad (23)$$

$$\bar{h} = \frac{K_f \cdot \overline{Nu}_1}{L} = 3,72 \frac{\text{W}}{\text{m}^2^\circ\text{K}} \quad (24)$$

El efecto de la temperatura ambiente del aire y de la velocidad del viento sobre la temperatura a la cual los gases del horno son descargados por la chimenea.

$$Ra_1 = 11722837,11 \approx 1,17 \times 10^7 \quad (25)$$

$$T_f = \frac{T_1 + T_2}{2} = 1323^\circ K \quad (26)$$

$$K_f = 0,082 \frac{W}{m^\circ K} \quad (27)$$

$$L = 6,7 \text{ in} = 0,170 \text{ m} \quad (28)$$

$$\overline{Nu}_l = \frac{\bar{h}L}{K_f} = 1 \quad (29)$$

$$\bar{h} = \frac{K_f}{L} = 0,482 \frac{W}{m^2 \circ K} \quad (30)$$

Cálculo del flujo de calor que se pierde por el techo del horno: $A_{techo} = 0,6140 \text{ m}^2$;

$$Q_{techo} = 543,51 \text{ W} \quad (31)$$

Cálculo del flujo de calor que se pierde por el piso del horno: $A_{piso} = 0,7316 \text{ m}^2$;

$$Q_{piso} = 647,61 \text{ W} \quad (32)$$

Cálculo del flujo de calor que se pierde por la pared trasera del horno: $A_{pared \text{ trasera}} = 0,1913 \text{ m}^2$;

$$Q_{pared \text{ trasera}} = 173,76 \text{ W} \quad (33)$$

Cálculo del flujo de calor que se pierde por la puerta del horno: $A_{puerta} = 0,1858 \text{ m}^2$;

$$Q_{puerta} = 164,4 \text{ W} \quad (34)$$

Flujo de calor total que se pierde por todas las paredes del horno:

$$Q_{total} = Q_{paredes} + Q_{techo} + Q_{piso} + Q_{pared \text{ trasera}} + Q_{puerta} = 2745,10 \text{ W} \quad (35)$$

4.7 Análisis de exergía

La Fig. 3, muestra la distribución de calor en todo el horno, se observa claramente que la zona de máximas temperaturas se encuentra localizada en el área central (núcleo de la flama) como era de esperarse. Ya que en esta zona se lleva a cabo el quemado del combustible.

$$\begin{aligned} \square_{ET} &= \square_{E \text{ AMB}} + \square_E = \square_{E \text{ AMB}} + (E_O - E) \\ &= Q_T - W_T = -W_T \end{aligned} \quad (36)$$

$$\square S_T = \square S_{AMB} + \square S_O = \square S_{AMB} + (S_O - S) \quad (37)$$

$$r_{aire} = 1,18 \frac{kg}{m^3}; T_0 = 298^\circ K; P_0 = 101 \text{ kpa}$$

Asumiendo una velocidad del viento de 10 m/s:

$$\dot{m} = r \square V = 1334 \text{ kg / s} \quad (38)$$

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \square T = 1195,26 \text{ kW} \quad (39)$$

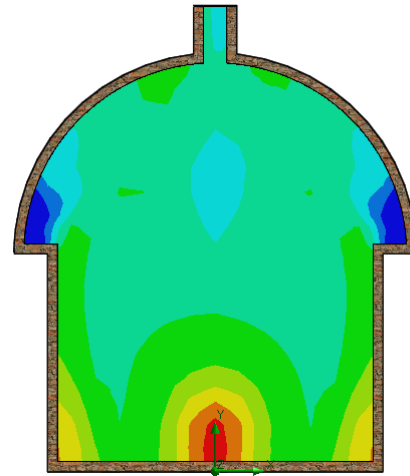


Fig. 3. Distribución de calor dentro del horno

4.8 Balance de Exergía

$$\Sigma \left[1 - \frac{T_0}{T_K} \right] * Q_K - [\dot{W}P(V_2 - V_1)] \quad (40)$$

$$+ \sum_{in} \dot{m}^? + \sum_{out} \dot{m}^? - X_d^? = \frac{? X}{? t}$$

$$\frac{? X}{? t} = 0; \left[1 - \frac{T_0}{T_K} \right] = 0; [\dot{W}P(V_2 - V_1)] = 0 \quad (41)$$

Quedando de la siguiente forma:

$$X_d^? = \sum_{in} \dot{m}^? - \sum_{out} \dot{m}^? \quad (42)$$

$$X_d^? = m_1^? \cdot ?_1 + m_3^? \cdot ?_3 + m_2^? \cdot ?_2 + m_4^? \cdot ?_4$$

Donde: $m_1^? = m_2^? ; m_3^? = m_4^?$

Analizando datos:

$$h_0 = 104,83 \frac{kJ}{kg}; h_1 = 83,915 \frac{kJ}{kg}; \quad (43)$$

$$h_2 = 3072,21 \frac{kJ}{kg}; h_3 = 251,18 \frac{kJ}{kg} \quad (44)$$

$$h_4 = 452,89 \frac{kJ}{kg}; S_0 = 0,3672 \frac{kJ}{kg - ^\circ K}; \quad (45)$$

$$h_4 = 452,89 \frac{kJ}{kg}; S_0 = 0,3672 \frac{kJ}{kg - ^\circ K}; \quad (46)$$

$$S_1 = 0,2965 \frac{kJ}{kg - ^\circ K}; S_2 = 7,8941 \frac{kJ}{kg - ^\circ K} \quad (47)$$

$$S_3 = 0,8313 \frac{kJ}{kg - ^\circ K}; S_4 = 3,8454 \frac{kJ}{kg - ^\circ K} \quad (48)$$

$$?_1 = (h_1 - h_0) - T_0 (S_1 - S_0) = 0,1536 \quad (49)$$

$$?_2 = (h_2 - h_0) - T_0 (S_2 - S_0) = 724,25 \quad (50)$$

$$?_3 = (h_3 - h_0) - T_0 (S_3 - S_0) = 8,0482 \quad (51)$$

$$?_4 = (h_4 - h_0) - T_0 (S_4 - S_0) = 6,4523 \quad (52)$$

$$X_d = m_1 (?_1 - ?_2) + m_3 (?_3 - ?_4) \quad (53)$$

$$S_{in} - S_{out} + S_{gen} = ? S \rightarrow ? S = 0 \quad (54)$$

Balance de entropía:

$$S_{gen} = S_{out} - S_{in} \\ - \left[m_1 S_1 + m_2 S_2 \right] + \frac{Q}{T_0} + m_3 S_3 + m_4 S_4 = S_{gen} \quad (55)$$

$$S_{gen} = 3,18 \frac{kW}{^\circ K}; X_d = T_0 S_{gen} = 947,64 kW \quad (56)$$

5. CONCLUSIONES

Se ha realizado un análisis del bagazo de caña de azúcar empleado en una finca panelera, destacándose su uso e importancia como biomasa residual (bagazo de caña de azúcar) en la combustión de un horno de lecho fijo, durante el proceso de producción de la panela.

Durante la combustión de bagazo de caña (bs) en lecho fijo la composición del gas y la tasa de combustión son afectadas por la mala disposición del proceso. El aumento en el contenido de humedad del bc incrementa el calor perdido en la etapa de secado, generando una reducción en el rendimiento de la combustión, el cual se ve reflejado en una disminución de la tasa de combustión y en la conversión carbono a CO₂ y el aumento de cenizas.

Los hornos de lecho fijo son una excelente solución al problema de generación de calor y electricidad, en la industria de caña de azúcar, porque se elimina la compra de energía, y de combustibles costosos, pero se incrementan los problemas ambientales, debido a la baja eficiencia térmica y de combustión con que operan (51%).

El sistema del horno hace que el 43% de calor que entra se pierda con las cenizas en forma de calor sensible lo cual se constituye en la mayor pérdida de calor que presenta el horno.

En el horno de combustión tan solo el 51 % del calor suministrado es utilizado para calentar las pailas utilizadas en el proceso clarificación, el 3.4% se pierde por incombustión mecánica y el 12% se pierde por convección y radiación a través de las superficies.

La eficiencia de combustión del horno de ladrillo es baja incrementando las pérdidas de calor por incombustión mecánica presentadas por el alto contenido de carbono de las cenizas (10%).

En la cámara de combustión se mezcla el 35% de aire frío con un 65% de gases producto de la combustión. Debido a lo anterior podemos afirmar que el 60% de la ceniza queda estancada dentro del horno generando problemas de desperdicios de cenizas.

El combustible (bagazo de caña) como fuente de energía renovable, aún tiene mucho para ser estudiada bajo el comportamiento de su combustión.

Se demuestra el papel protagónico del bc en la combustión del horno en todo el proceso de la panela, generar un ciclo de sostenibilidad mejora sustancialmente el producto final, aumentando en un 40% el rendimiento del horno y por ende un nivel de producción de panela más económico. Por lo anterior, es recomendable utilizar un sistema de pre secado durante la combustión de bc, ya que incrementa la tasa de combustión y el rendimiento de la biomasa.

REFERENCIAS

- Agüero, A. C., Pisa, J. R., Agüero, C. J., & Bugeau, A. T. (2004). Poder Calorífico del Bagazo de Caña de Azúcar. *Revista de Ciencias Exactas E Ingeniería*, 13(24), 33–37.

- Alarcon, G., Olivares, E., Barbosa, L., & Glauco, C. (2006). Caracterización del bagazo de la caña de azúcar. Parte I Características Físicas. Proceedings of the 6. Encontro de Energia No Meio Rural, pp. 1–10.
- Alarcón, G., Sanchez, C. G., Gómez, E. O., & Cortez, L. A. B. (2006). Caracterización del bagazo de la caña de azúcar: Parte I: características físicas. Enc. Energ. Meio Rural.
- Baloh, A., & Wittwer, E. (1995). Energy manual for sugar factories: Manual de energía para fábricas de azúcar. (p. 200).
- Castro, Z., Reinel, H., Bernal, G., Andrés, O., & Menjura, M. (2013). Efecto del precalentamiento del aire primario y la humedad del bagazo de caña de azúcar durante la combustión en lecho fijo Effect of primary air preheating and moisture sugarcane bagasse during fixed bed combustion. Corpoica Ciencia Tecnológica Agropecuaria, 14, pp. 5–16.
- Comunicado de Prensa. (2013). Fedepanela concerta con ministro de agricultura plan estratégico para apoyar el sector panelero del país. FEDEPANELA.
- Díaz, M., Rodríguez, D., Lizarazo, H., Delgado, D., Dueñas, F., Peñaranda, L., & Bernal, O. J. (2013). Diseño y construcción de un sistema prototipo para el aprovechamiento de biogas el en proceso de curado de tabaco virginia para hornos flue cured. Revista colombiana de tecnologías de avanzada (rcta), 1(17).
- Escobar, I. C. B. (1997). La caña de azúcar en el Valle del Cauca. Credencial Historia N°92.
- Fristrom, R. M. (1969). Fundamentals of combustion. Combustion and Flame.
- García, H. (2011). Desarrollo de modelos demostrativos de hornillas de alta eficiencia térmica y bajo impacto ambiental de acuerdo con los niveles socioeconómicos y técnicos de las principales regiones productoras de panela en Colombia-Informe final presentado al MADR. Corpoica Ciencia Tecnológica Agropecuaria.
- Hernández, E. (2011). Estado del Arte y Novedades de la Bioenergía en el Colombia. Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación Y La Agricultura., 5(4), pp. 1–33.
- Kausley, S., & Pandit, A. (2010). Modeling of solid fuel stoves. Fuel, 8(3), pp. 782–791.
- Molina, J. S., Díaz, J. F. G., & Ramírez, R. P. (2013). Implementación de un sistema tipo scada para mejorar los procesos de secado y cocción de la ladrillera sigma Ltda. Revista colombiana de tecnologías de avanzada (rcta), 2(20).
- NASA Surface meteorology and Solar Energy: RETScreen Data. (2014). Retrieved April 25, 2014, from <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets@nrcan.gc.ca&step=1&lat=8.45&lon=-72.45&submit=Submit>
- Paz, D., & Cárdenas, G. (1999). Secadero de bagazo o economizador? : análisis comparativo de su influencia en el rendimiento energético neto de una caldera bagacera. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán, 76, pp. 1–11.
- Pérez, F. G., Fernández, J. F. P., & Sánchez, J. L. C. (2007). Método para determinar el calor específico de combustión del bagazo a partir de los principales factores agroindustriales en la industria de la caña de azúcar. Ecosolar, N°21.
- Porteiro, J., Patiño, D., Collazo, J., Granada, E., Moran, J., & Míguez, J. (2010). Experimental analysis of ignition front propagation of several biomass fuels in a fixed-bed combustor. Fuel, 89(1), pp. 26–35.
- Ramajo-Escalera, B., Espina, A., García, J., Sosa-Arnan, J., & Nebra, S. (2006a). Model-free Kinetics applied to sugarcane bagasse combustion. Thermochimica, Acta 448(2(0040-6031), pp. 111–116.
- Ramajo-Escalera, B., Espina, A., García, J., Sosa-Arnan, J., & Nebra, S. (2006b). Model-free Kinetics applied to sugarcane bagasse combustion. Thermochimica, Acta 448(2), pp. 111–116.

SÍMBOLOGÍA

ΔV	Diferencial de volumen.
ΔS	Diferencial de entropía.
ΔT	Diferencial de temperatura.
Bc	Bagazo de caña.
Bs	Base seca.
Char	Residuo carbonoso.
C_c	Consumo de bagazo.
C_p	Calor específico.
?	Densidad.
h	Entalpía.
L	Longitud.
m_{as}	Flujo de masa.
Nu_i	Número de Nusselt.
P_C	Poder calorífico.
P_{CS}	Poder calorífico superior.
P_{CI}	Poder calorífico inferior.
Q	Cantidad de Calor.
R_c	Resistencia por conducción.
S	Entropía.
T	Temperatura.
U	Coefficiente global de transmisión.